第2章

きょう体内部の熱の振る舞いと放熱設計の鉄則7カ条

通気孔やファンの最適な配置がわかる

澤井由美子

ここでは，電子機器内部における熱の動きをシミュレーションを用いて観察する．熱の動きが見えてくれば，必然的に放熱設計における決まり事が明確になってくる．（編集部）

第1章では電子機器の放熱設計について述べてきました．重要な点は「急速な小型化，高機能化に伴う熱の増大により，放熱設計が電子機器全体の設計において重要な設計要素の一つとなっている」ことと，「試作前の設計段階（**表1**）で熱的な問題を把握し，各設計部門がお互いの情報を共有して調整しながら，できる限りの対策を施し，設計の確度を高めないと大きな手戻りにつながる」ことでした．

実際に電子機器の設計を行う場合，その仕様決定は市場ニーズと競争力強化の観点から行われます．例えば，

- 製品仕様は，競合他社製品よりも魅力的な製品にするために，高機能化や高性能化を目指す→発熱量の増大
- きょう体サイズは競合他社よりも小型化を目指す→発熱密度が高くなる
- 冷却方式（ファンのありなしや通気孔のありなし）は使用環境から決める．例えば，オーディオ製品においてはファンの音がユーザに嫌がられる，工場内ではファンや通気孔があると機器内にごみが入りやすいなどの制約がある

などといったことが挙げられます．その結果，機能仕様を満たす高性能な製品が完成しても，温度仕様を満たさない構成となり（**図1**），試作後の温度測定で問題が発生し，慌てて対策を検討することになるのです．

そこで，第2章では各設計段階（**表1**）で検討しておくべき基本的な放熱設計について，難しい数式は使わず，事例を交えながら紹介します．

表1　各設計段階で検討しておくべき基本的な放熱設計

工　程	構想設計 →	基本設計 →	詳細設計 →	試　作 →	量　産
主な検討事項	●機能，仕様，性能			●各種評価	
	●大まかな回路設計	●回路設計 ●部品選定	●アートワーク ●伝送路，EMI		
	●きょう体デザインやサイズ	●きょう体の主な構造	●きょう体強度 ●EMI		
	●プリント基板の枚数	●プリント基板配置			
	●製品全体の発熱量	●プリント基板全体，部品個別の発熱量算出			
放熱設計の主な検討事項	●冷却方式（鉄則1）	●ファン，通気孔の大まかな配置（鉄則3）	●ファンや通気孔の詳細形状と配置	●温度測定（鉄則6）	
		●プリント基板配置（鉄則2）	●配線パターンにおける銅はくの形状		
		●主な発熱部品の配置	●部品の配置（鉄則4） ●各発熱部品の個別対策（鉄則5）		

KeyWord　ヒートシンク，ヒートパイプ，通気孔，ファン，形状，発熱量，自然空冷用，強制空冷用，シリコン・グリース，熱電対，シミュレーション

図1　性能が高くても熱くて触れられない機器は使えない

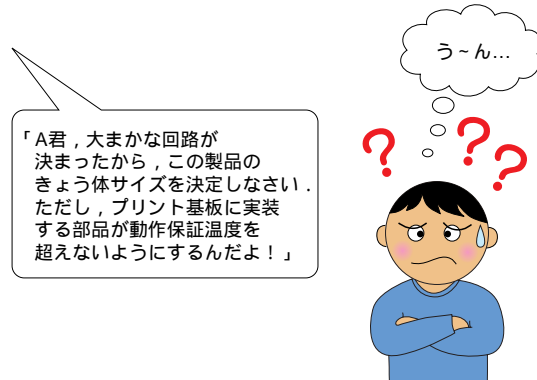



図2　設計構想段階で放熱を考慮したきょう体サイズを決めるのは至難の業

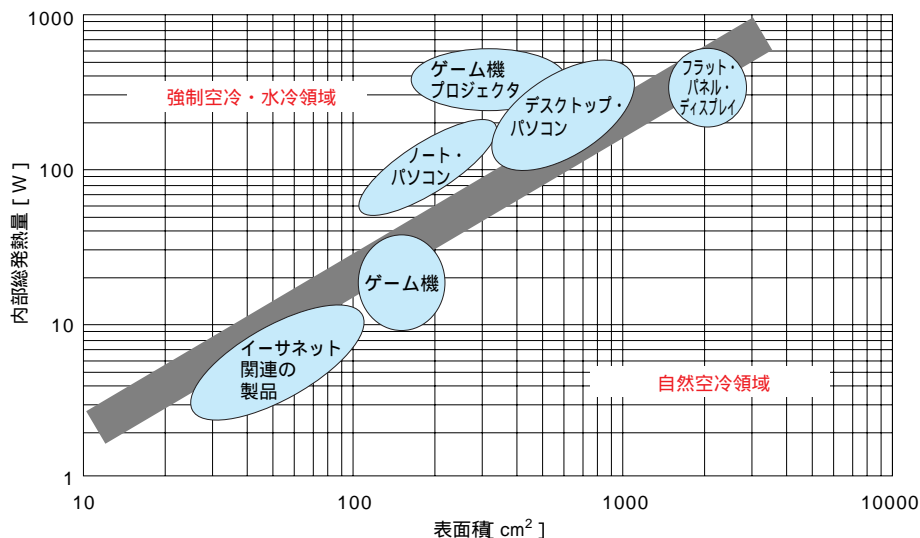



図3
冷却方式を見積もるための図
グレーのラインを境に，ラインより上側を強制空冷または水冷の製品，ラインより下側を自然空冷の製品と，大まかに分類できる．

1 構想設計の段階での放熱設計

● 鉄則1　きょう体サイズと内部総発熱量の関係を見極める

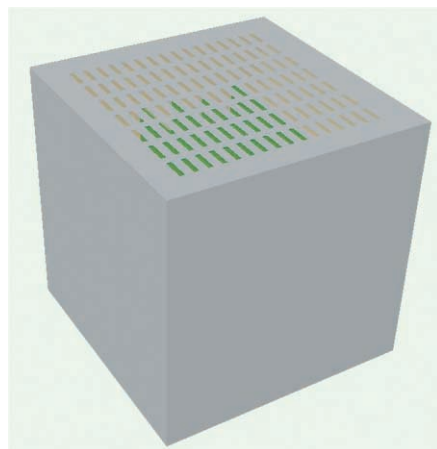
機能仕様と大まかな回路しか決まっていない初期の構想設計の段階において，

- この電子機器のきょう体サイズは，どのくらい必要なのだろうか
- この電子機器には通気孔が必要なのだろうか，それともファンが必要なのだろうか

と聞かれても，頭を抱えてしまう設計者も多いのではないでしょうか（図2）．初期の構想設計の段階では，どのメーカの部品を使用するかさえ決まっていないことも多いため，部品個々の動作保証温度も不明確であり，詳細な放熱設計を検討することはできません．では，初期の構想設計の段階では，何を検討すればよいのでしょうか．それは，

- きょう体サイズと内部総発熱量の関係を見極める
- 冷却方式（ファンなし・あり，水冷など）を見極める

ことです．

図3は市場の電子機器について，横軸をきょう体サイズ（表面積），縦軸を内部総発熱量として分類しています．すると，グレーのラインを境にラインより上側を強制空冷または水冷の製品，ラインより下側を自然空冷の製品と，大まかに分類できます．これは，冷却方式を自然空冷とする

(a) 通気孔(きょう体天板と底面に設置)

(b) きょう体内部

青枠はきょう体

(c) 温度分布

(d) 風の流れ

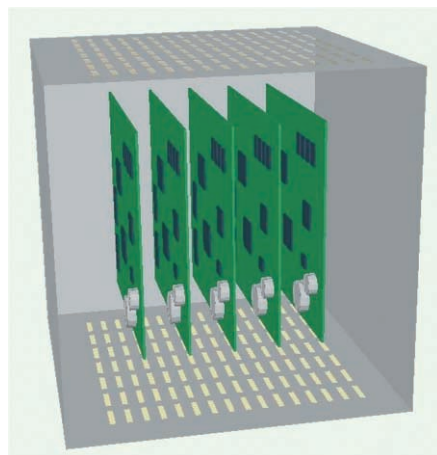
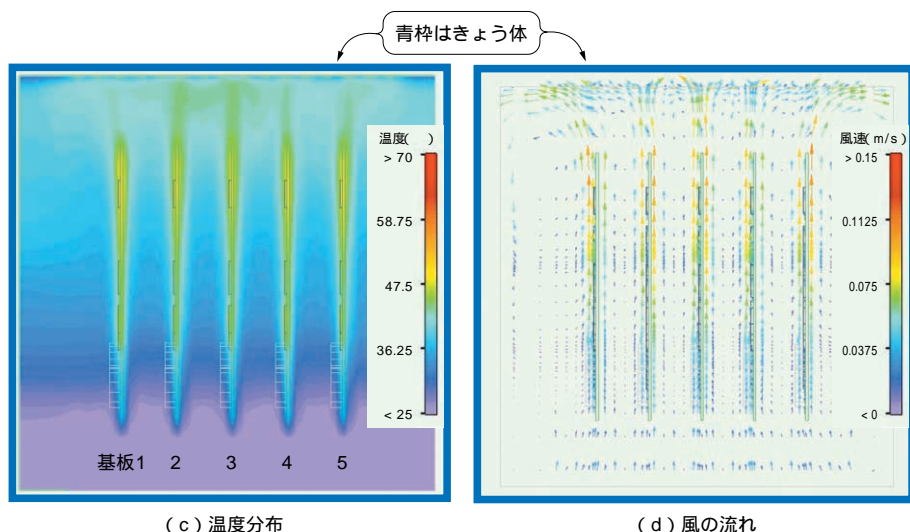



図4
モデル①―複数のプリント基板を垂直に配置したときの熱と風の流れのシミュレーション結果

場合，そのきょう体の許容発熱量はきょう体の表面積と通風孔面積でほぼ決まってしまうので，この許容発熱量を越える製品は強制空冷または水冷を採用することが多くなるためです．これを無視して設計を進めると，試作後に温度的な問題が発生した場合，どのような対策を施しても解決法が得られず，きょう体サイズの変更やファン追加などの大きな手戻りが発生してしまうのです．このグレーのラインは，世の中に紹介されている「きょう体内部の空気温度上昇Δ_Tを推測するための計算式(計算式の詳細は参考文献(1)を参照)」で，きょう体の通気孔を天板の20～30％程度確保し，きょう体内部の空気温度上昇Δ_T＝15～25℃として計算した結果とほぼ同じになります．

もちろん，グレーのラインより上側の強制空冷，水冷領域にあっても，例えば，

- 動作保証温度の高い部品(インダストリアル品)を選定する
- きょう体の表面積を大きくするためにきょう体をフィン形状にする

などの対策を行うことにより，自然空冷が可能になることもあります．逆にグレーのラインより下側の自然空冷領域にあっても，部品の動作保証温度が低い場合や，ヒートシンクおよびヒートパイプなどの放熱構造を採用することができない場合は，強制空冷を採用することもあります．

重要なことは，このグレーのラインよりも上側にあるから強制空冷，下側にあるから自然空冷と決めつけるのではなく，設計初期の段階でその電子機器がどの放熱設計レベルにあるのかを確認しておくことです．その機器をどうしても自然空冷にする必要があれば，

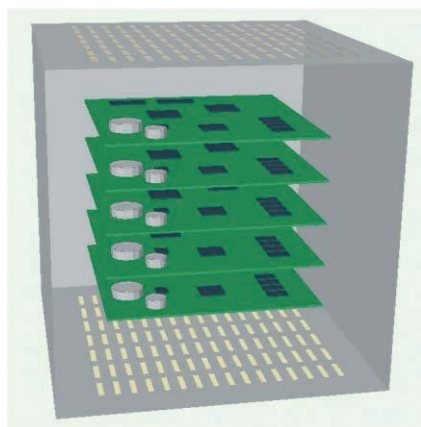
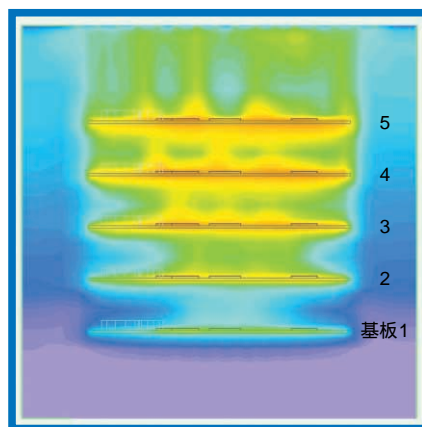
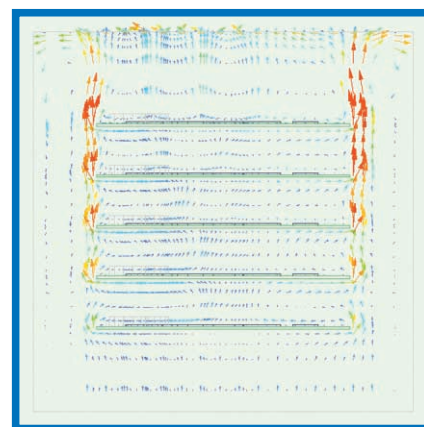
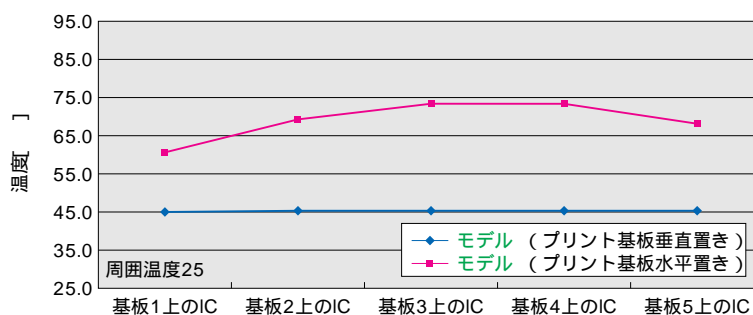
- かなり大掛かりな放熱構造の採用や，耐熱部品の選定を検討しなければならない

（a）きょう体内部

（b）温度分布

（c）風の流れ

図5 モデル②―複数のプリント基板を水平に配置したときの熱と風の流れのシミュレーション結果
水平配置の場合，プリント基板の熱により温められた空気がプリント基板間に停滞する．

図6 プリント基板上の部品温度の比較結果
モデル②の部品のほうが温度が高い．

- このきょう体サイズの場合は，総発熱量は○W以下に抑えるように回路を見直されなければならない
- この総発熱量の場合は，きょう体サイズはこのくらいにしなければならない

といった，放熱設計の大まかな方向付けを行っておくことが，設計の確度を高める鍵となり，試作後の大きな手戻りを防ぐことにつながるのです．過去に設計を行った製品について，きょう体サイズと内部総発熱量を分析し，独自のグラフを作成しておくのもよいでしょう．

2 基本設計の段階での放熱設計

● 鉄則2　自然空冷の場合，プリント基板は垂直に配置する

きょう体サイズや内部のプリント基板の枚数などが大まかに決まってきた段階で検討しなければならないのは，これらプリント基板の配置です．ファンを使用しない自然空冷の場合，プリント基板上の半導体などの発熱体によって温められた空気は上に移動していきます．そのため，発熱体の上に障害物があると温められた空気が停滞してしまうので，プリント基板上の半導体などは熱が逃げにくくなり，温度が上昇してしまいます．

では，プリント基板上の空気を効率良く外へ排出させるためにはどうしたらよいのでしょうか．自然空冷の場合，プリント基板は垂直に配置することです．**図4**～**図6**に，複数のプリント基板を水平に配置した場合と，垂直に配置した場合に，温度分布がどのようになるかをシミュレーションした結果があります．

モデル①と**モデル②**は，きょう体とプリント基板は全く同じですが，プリント基板の配置方向だけが異なります．**モデル②**の水平配置の場合，プリント基板の熱により温められた空気がプリント基板間に停滞するため，**モデル①**の垂直配置の場合よりも温度が上昇しています．

図7に，水平に配置した場合と垂直に配置した場合の，隣り合うプリント基板の間隔が温度上昇に与える影響についてシミュレーションした結果を示します．垂直に配置し

モデル①(垂直置き，基板3上のICの温度)
モデル②(水平置き，基板3上のICの温度)
温度[°C]
周囲温度25°C
基板どうしの間隔[mm]

図7
隣り合うプリント基板の間隔が温度上昇に与える影響
モデル②の水平置きでは，プリント基板の間隔も重要な設計要素となる．

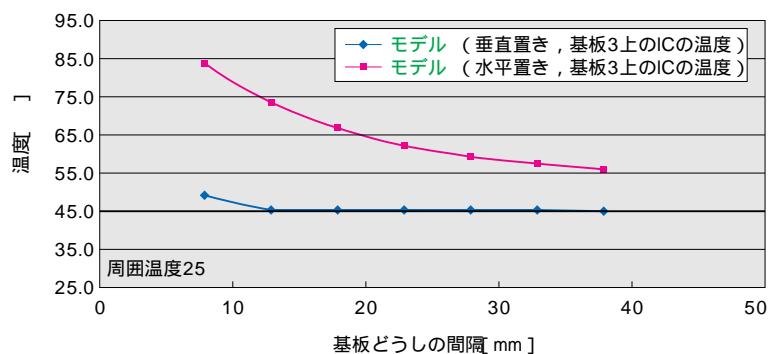
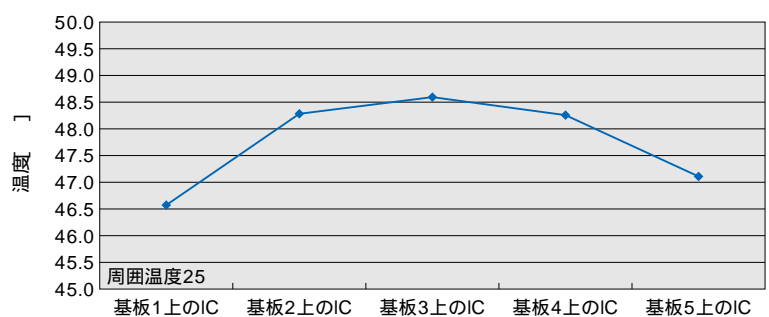



図8
プリント基板を垂直に配置した際のプリント基板上の部品温度の比較
中央に配置した部品は温度上昇値が大きい．

た場合は適度な間隔を開ければ影響を受けにくくなるのに対し，水平に配置した場合は間隔をあけても隣接するプリント基板からの熱干渉の影響を受け続け，垂直配置の3倍以上の間隔を確保しても垂直配置と同じ温度にすることはできません．これに対応しようとすると，きょう体サイズが大きくなるばかりで商品価値が下がってしまいます．

このように自然空冷の場合は，プリント基板を垂直に配置することが，放熱設計には非常に有効です．ただし，垂直配置の場合でも，プリント基板間隔が狭い場合や発熱量が多い場合は，中央に配置するプリント基板は温度上昇が大きくなるため(**図8**)，端に配置するなどの対策が必要となることもあります．

● 鉄則3　通気孔やファンは，数，サイズよりも風の流れを考えて配置する

きょう体に通気孔やファンを設ける場合は，大まかにその位置と数を決める必要があります．数を増やせば放熱に有利になるような気もしますが，実はそうではない場合もあります．むやみに通気孔を設けたり，ファンの数を増やしても，冷却したい部品に効率良く風が当たらないことがあります．通気孔やファンは，数やサイズよりも風の流れを考えて配置するべきです．

図9，**図10**に，強制空冷製品の通気孔とファンのサイズを変更した際の，プリント基板上の温度をシミュレーションした結果を示します．**モデル③**と**モデル④**は，きょう体とプリント基板外形は全く同じですが，**モデル④**の方が通気孔，ファン共に小さいサイズとなります．

この製品は，プリント基板5枚で構成されていますが，発熱するのは下側に配置するプリント基板で，上側4枚のプリント基板はほとんど発熱しません．当初，機構設計担当者は，きょう体内部にできるだけ多くの風を流入させることで内部の熱を効率よくきょう体の外へ排出しよう考え，**モデル③**のように，きょう体の高さとほぼ同サイズの通気孔とファンを採用しました．その結果，たしかにきょう体内部全体へ多くの風が流入し均一に風が流れますが，下側のプリント基板付近を十分に冷却できないことが分かりました．

そこで**モデル④**のように，ファンと通気孔サイズを**モデル③**よりも小さくし，下側のプリント基板に集中して風を流すようにしました．すると，きょう体内部へ流入する空気量は減りますが，冷却したい下側のプリント基板に風を集め風速を上げることができるため，**モデル③**よりも効果的に冷却できました．

図11～**図14**に，ファンの数と風の流路を変更した場合

(a) 外観

(b) 温度分布

(c) 風の流れ

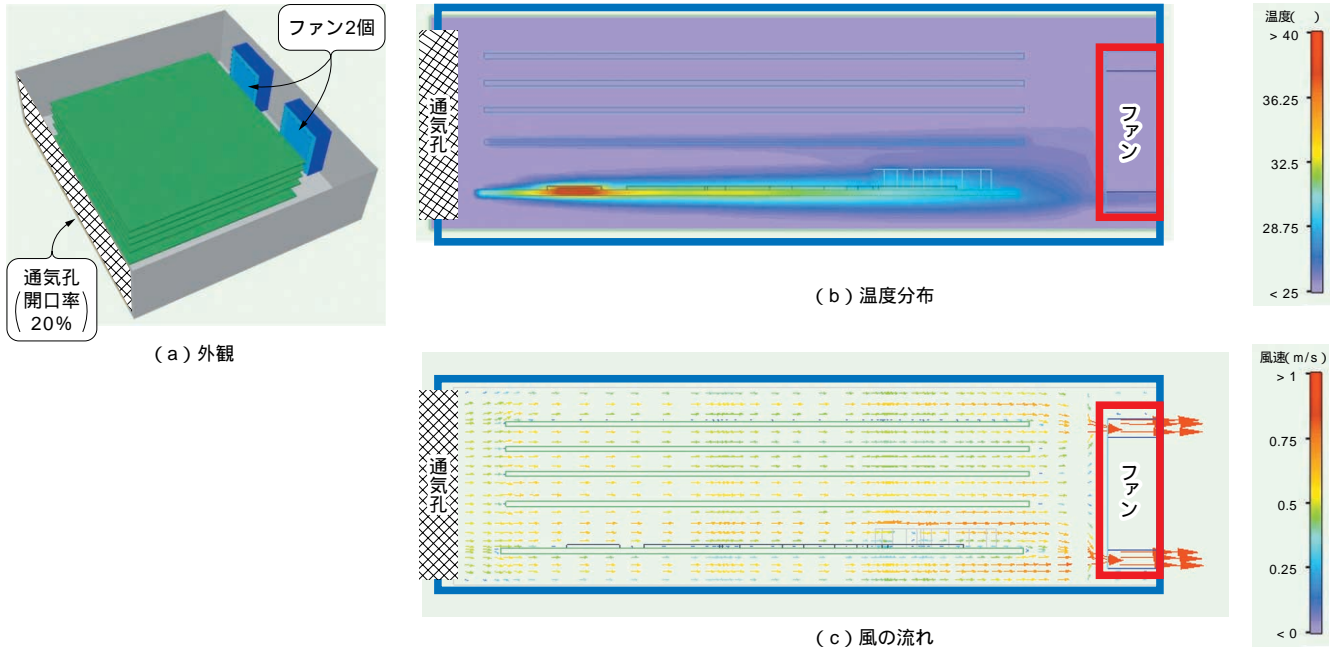



図9　モデル③―きょう体とほぼ同じサイズの通気孔とファンを採用した場合の温度分布と風の流れ
下側のプリント基板付近を十分に冷却できていない．

(a) 外観

(b) 温度分布

(c) 風の流れ

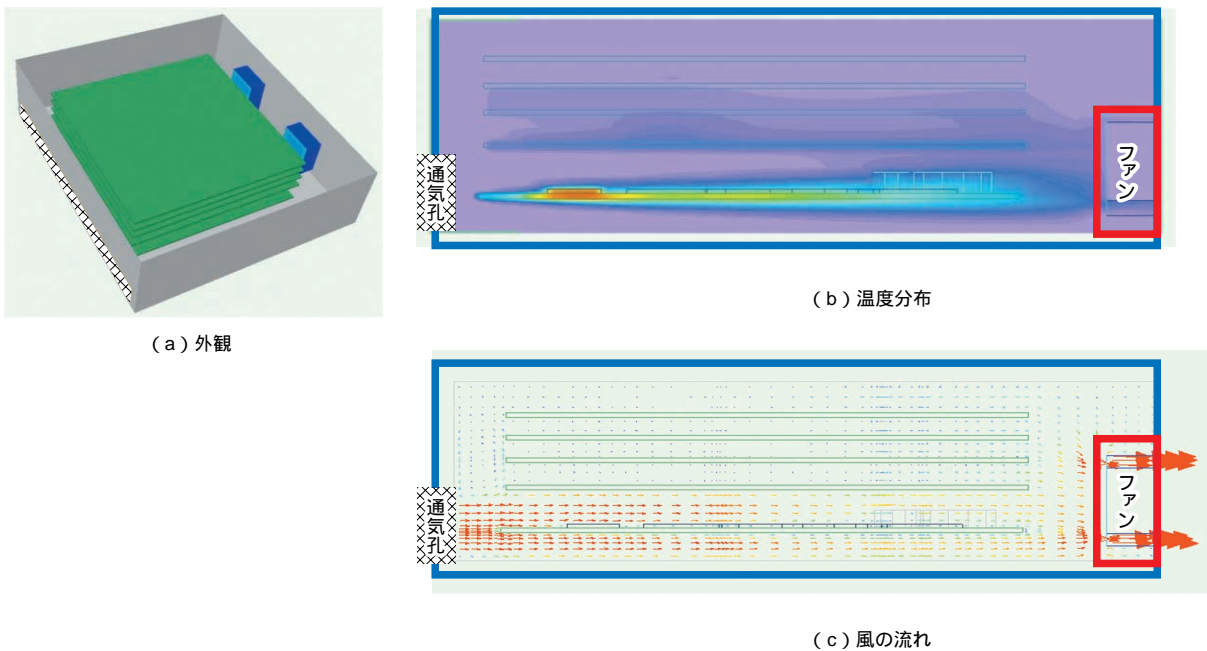



図10　モデル④―最下段のプリント基板に風が当たるように，きょう体の高さより小さな通気孔とファンをを採用した場合の温度分布と風の流れ
モデル③よりも効果的に冷却できている．

の，プリント基板上の部品温度を比較したシミュレーション結果を示します．**モデル⑤～モデル⑦**は，きょう体とプリント基板は全く同じですが，ファンの数または内部の流路が異なります．この製品は，同種類のプリント基板4枚で構成されていて，すべてのプリント基板を冷却する必要があります．

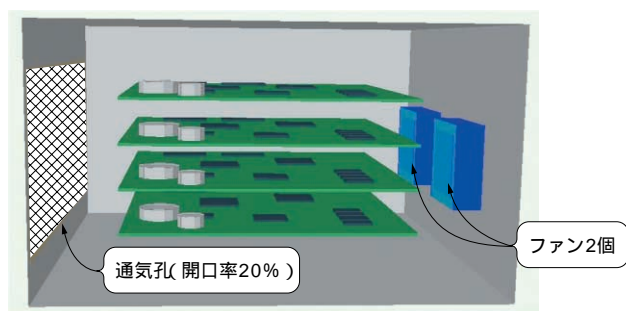
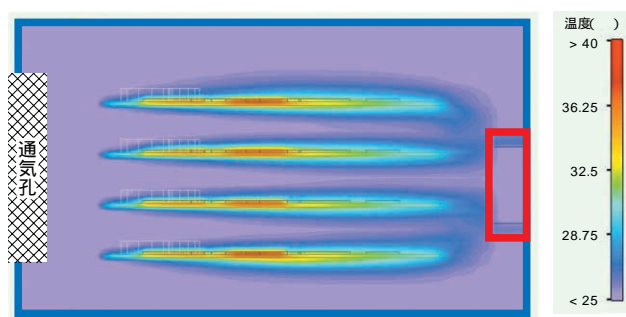
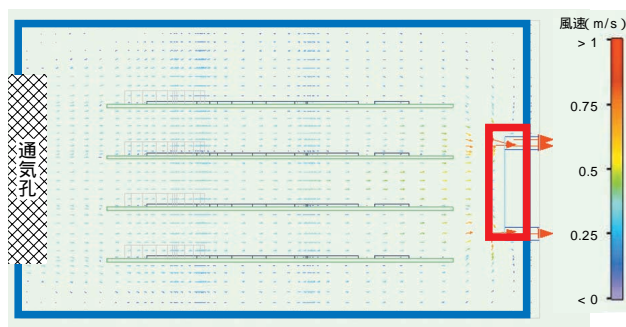
モデル⑤のようにファンを2個配置した場合，プリント基板以外の空間にも風が流れるため，プリント基板付近に

(a) 外観

(b) 温度分布

(c) 風の流れ

図11　モデル⑤－プリント基板4枚，ファン2個の場合の温度分布と風の流れ
プリント基板付近に十分な風が流れていないとする．

(a) 外観

(b) 温度分布

(c) 風の流れ

図12　モデル⑥－モデル⑤に対してファン2個追加．ファンは計4個．
モデル⑤に対して冷却能力を高めた．

十分な風が流れず(風速0.4m/s程度)，十分冷却できないことが分かりました．この場合，**モデル⑥**のようにファンの数を2倍の4個に増やして冷却能力を高める構成が提案されることが多いのですが，実はファンの数を増やさなくても，同程度の効果を得る方法があります．それは**モデル⑦**のように，きょう体内部に仕切りを入れることで，プリント基板付近の風の流量と風速を増加させる方法です．

図14に**モデル⑤**～**モデル⑦**のプリント基板上の部品温度を比較した結果があります．ファンを4個に増やすよりも，きょう体内部に仕切りを入れたほうが冷却効果が高いことが分かります．強制空冷の場合，通気孔やファンはその数を増やしたりサイズを大きくするよりも，通気孔のサイズやきょう体内の流路を適度に狭めて，冷却したい個所に集中して風を流すように配置することが非常に重要となります．

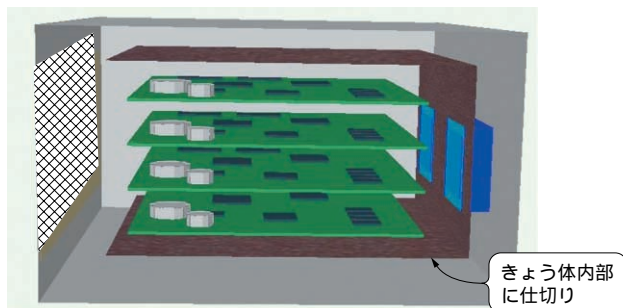
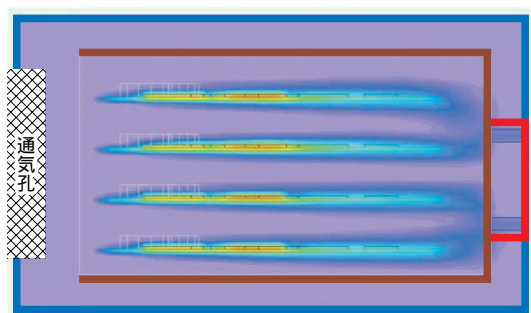
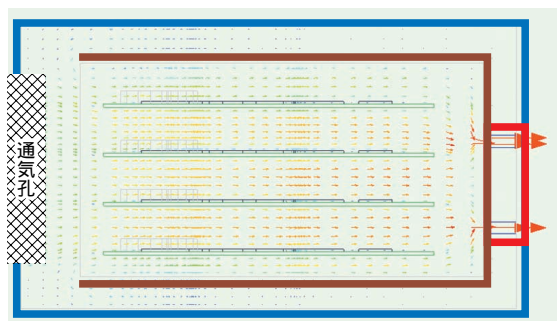
ここでは強制空冷の事例だけ紹介しましたが，自然空冷の場合も同じように，通気孔は吸気側から流入した冷気が発熱体付近に流れ，その発熱体により温められ，対流を生かして排気側へと放熱するように流路を確保しなければなりません．

(a) 外観

(b) 温度分布

(c) 風の流れ

図13　モデル⑦－モデル⑤に対してきょう体内に仕切りを追加．
プリント基板付近の風の流量と風速を増加させた．こうすることでファンの追加は不要となった．

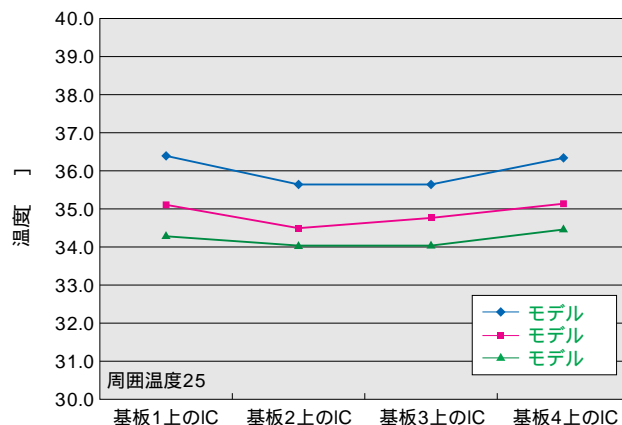



図14　モデル⑤～モデル⑦のプリント基板上の部品温度を比較した結果
通気孔やファンは，その数を増やしたり，サイズを大きくするよりも，通気孔のサイズやきょう体内の流路を適度に狭めて，冷却したい個所に集中して風を流すように配置する．

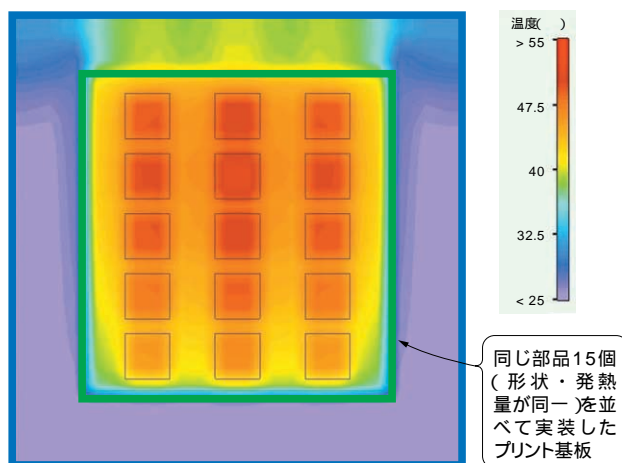



図15　モデル⑧－同じ部品15個をプリント基板上に並べて実装した際のシミュレーション結果
実装位置によって部品の温度が異なる．

3 詳細設計に入る前にやっておくべき放熱設計

● 鉄則4　熱を出す部品/出さない部品，熱に強い部品/弱い部品を調べて配置する

回路設計もほぼ完了した段階で検討しなければならないのは，部品の配置です．部品配置を検討する際に優先される項目は，

- 信号遅延を防ぐために配線長を短くすること
- プリント基板サイズを小さくするために，高密度実装にすること

などがありますが，部品配置は熱的にも大きな影響を与えるため，気を付けるべき点があります．それは，部品配置は熱を出す部品/出さない部品，熱に強い部品/弱い部品を調べて配置することです．

図15は，同じ部品15個(形状，発熱量が同一)をプリント基板に並べて実装した際のシミュレーション結果です．形状と発熱量が同一であるにもかかわらず，実装される位置により部品温度が異なることが分かります．これは，プリント基板の上側に実装される部品ほど，下側に実装され

た部品により温められた空気が上昇してくるためです．これよりプリント基板下側に実装する方が，冷却効果が高いことが分かります．

図16，**図17**に，プリント基板上の部品配置を上下反転させた場合のシミュレーション結果を示します．熱に強い高発熱部品IC2～IC5と，熱に弱い低発熱部品コンデンサ1およびコンデンサ2（コンデンサ自身はほとんど発熱しないが，周囲温度が高いと製品寿命が短くなる）に着目します．**モデル⑨**では高発熱部品であるIC2～IC5をプリント基板上部に配置しているため，これらの温度は上昇します．ただし，ほかの部品へ及ぼす影響は少ないため，熱に弱いコンデンサの温度上昇を抑えることができます．

それに対して**モデル⑩**では高発熱部品のIC2～IC5をプリント基板下部に配置しているため，製品全体の最高温度を下げることはできます．しかし，熱に弱いコンデンサの温度は上昇してしまうので，製品寿命を満たすために価格の高いコンデンサを選定しなければならない可能性もあります．

このように，プリント基板に部品を実装していく際に全く同じ部品を使っていても，その配置によって温度分布が大きく異なり，これにより放熱対策が新たに必要となってくる場合もあるのです．そのため部品を実装する前に，熱を出す部品/出さない部品，熱に強い部品/弱い部品を調べて，以下のように配置することが重要です．

- 熱を出す部品＋熱に強い部品の場合…ほかの部品に影響を与えない場所（風下）に配置する．
- 熱を出す部品＋熱に弱い部品の場合…ほかの部品の影響を受けない場所（風上）に配置する．さらに，その部品の風下に熱に弱い部品を配置しない．また，これらが複数ある場合には，近傍に配置しない．風の流れに沿って並べない．
- 熱を出さない部品＋熱に強い部品の場合…どこでも配置できる．
- 熱を出さない部品＋熱に弱い部品の場合…ほかの部品の影響を受けない場所（風上）に配置する．

（a）モデル⑨

（b）モデル⑩，（a）に対して部品配置が上下逆

図16　モデル⑨，モデル⑩－プリント基板上の部品配置を上下反転させた場合のシミュレーション結果
全く同じ部品を使っていても，その配置によって温度分布が大きく異なる．

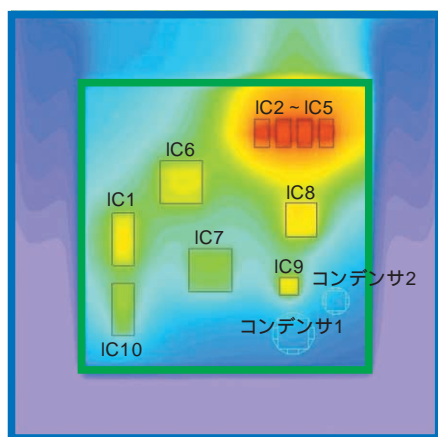
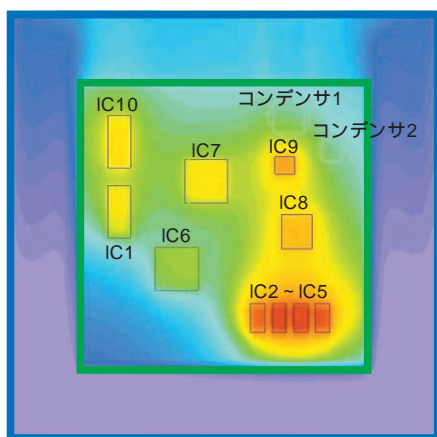
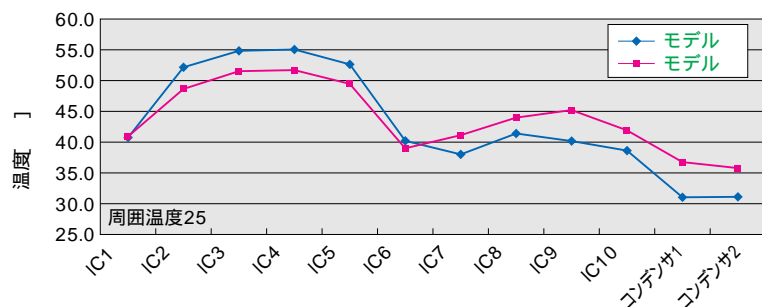



図17　図16に示した各プリント基板上の部品温度の比較

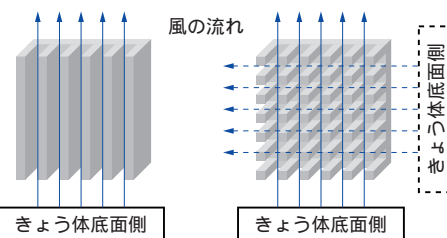



図18　ヒートシンクの形状と熱の流れ
きょう体の設置方向が変わる場合は（b）のようなピン型ヒートシンクを選ぶ．

● 鉄則5　ヒートシンクの特性をとことん理解してから利用する

きょう体に通気孔やファンを設けても，部品配置を最適化しても，動作保証温度を超えそうな発熱部品がある場合には，熱を拡散させるためにヒートシンクを取り付けることがあります．では，そのヒートシンクを取り付ける場合の留意点を挙げてみます．

1）風の流れに沿って取り付ける．または，指向性のあるヒートシンク形状を選定する

ヒートシンクは放熱面積が広くなる形状をしているので，発熱体の熱を伝導，拡散させて，空気中への熱伝達，熱放射による放熱量を増加させることができます．そのため，ヒートシンク表面に風が流れやすいように配置することで冷却効果が高くなるので，押し出しのくし型ヒートシンクの場合は，風の流れに対して図18(a)のように配置します．また，きょう体の設置方向が変わる場合は図18(b)のようなピン型ヒートシンクを選びます．

2）表面はアルマイト処理する

金属素地表面の放射率は通常0.1以下なので，表面処理を行わないと熱放射による放熱量が低下します．そこで，ヒートシンク表面の放射率を高めるために，アルマイト処理を行います．（図19）．

3）自然空冷用と強制空冷用を正しく選定する

ヒートシンクには，自然空冷用と強制空冷用があります（写真1）．自然空冷の場合，ヒートシンクのフィン間隔が狭すぎると，空気の流れが悪くなり熱伝達による放熱量が減ってしまうため，最適なフィン間隔を確保した「自然空冷用」を選びます．それに対し強制空冷の場合は，ヒートシンクのフィン間にファンによる風を強制的に流すため，自然空冷用よりもフィン間が狭く表面積が多くなっている「強制空冷用」を選びます．

4）熱源への取り付けは，接触熱抵抗を低減させる

ヒートシンクを発熱体に直接取り付けると，第1章の図9のようにミクロな凹凸が発生し，熱が伝導しにくくなるため，シリコン・グリースの塗布や弾力性のある熱伝導シートの挿入で伝熱量を向上させます．

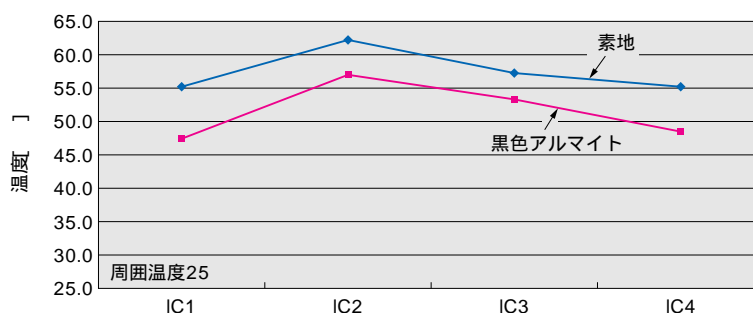
4 試作後の放熱設計

● 鉄則6　試作後の温度測定は正確に行う

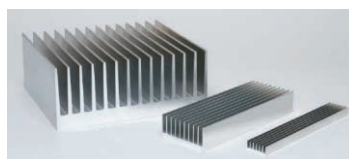
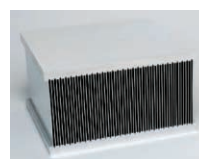
試作が完成した段階で，熱的な仕様を満たしているかどうかを確認するために，温度測定を行います．この温度測定の結果を基に，

- 熱的な仕様を満たしている場合は放熱設計がオーバ仕様になっていないか確認し，量産に向けて放熱設計の最適化
- 熱的な仕様を満たしていない場合は放熱設計の見直し

を行うため（図20），温度測定結果は非常に重要なデータとなります．特に，試作前にシミュレーションを活用して放熱設計を行っている場合には，温度測定結果とシミュレーション結果の合わせこみを行うことで，その結果を活用して，さらに確度の高い放熱設計を行うことができます．実際には，温度測定が正しく行われないことが多く，この

図19 ヒートシンク表面へのアルマイト処理のありなしによる温度の違い

（a）自然空冷用

（b）強制空冷用

写真1[3] ヒートシンクの外観

「一見，正しそうな温度測定結果」に振り回されることもあります．そのため，試作後の段階での温度測定は正確に行うべきなのです．

きょう体内部の部品の温度測定には，熱電対温度計（**写真2**）がよく使われます．熱電対は，「種類の異なる金属の両端を接合し，この両端間に温度差が生じると電圧が生じる現象（**図21**）」を利用して温度を測定します．熱電対に使用される金属には数種類あり，日本工業規格（JIS）で規格化されています．この熱電対を利用した温度測定で気を付けるべき点をいくつか挙げてみます（**図22**）．

a) 温度測定環境は空調の影響を受けない無風に近い空間とする…自然空冷の場合，エアコンの風が当たる場所で温度測定すると実際の温度より低い結果となるため．

b) 熱電対温度計の固定は，接着剤ではなく熱伝導率の高いアルミ・テープなどを使用し，温度を測定する部品表面にはわせるようする…接着剤を使用した場合，温度を測定したい部品と熱電対温度計の間に接着剤が入り込み，正確な温度を測定できなくなるため．なお，熱電対温度計の固定は，温度を測定したい部品表面だけでなく，近傍のプリント基板などにも行う．理由は，熱電対温度計を取り付け後にきょう体を組み立てる際，熱電対温度計に外力が加わり外れやすくなるため．

c) 熱電対温度計の線径は，できるだけ細いものを使用する…温度を測定したい部品表面に太い熱電対温度計を取り付けると，熱電対温度計を経由して熱が逃げやすくなり，正確な温度が測れないため．

d) 熱電対温度計の本数は欲張らない…熱電対温度計を多数取り付けると，きょう体内部の風の流れを遮り放熱効果を低下させ，正確な温度が測れないため．

e) 温度測定は各部位の温度が定常状態になるまで行う…一般的には2時間以上必要．

f) 熱電対温度計の種類と測定器の設定が一致しているかを確認する…前述の通り，熱電対温度計に使用されている

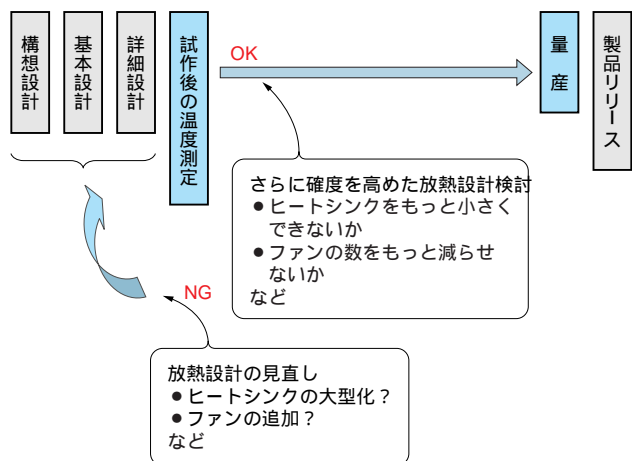



図20　試作後の温度測定の持つ意味あい
一見，正しそうな温度測定結果に振り回されることがないようにする．

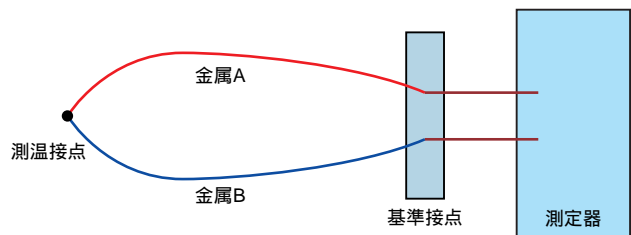
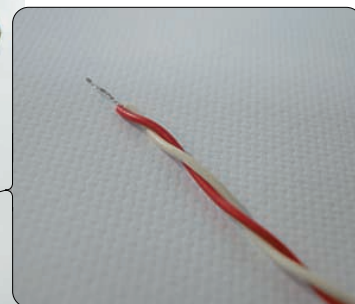



図21　熱電対のしくみ
種類の異なる金属の両端を接合し，この両端間に温度差が生じると電圧が生じる．

写真2
熱電対を取り付けたデータ・ロガーの例
江藤電気の「キャダック21」．熱電対は竹田特殊電線製造所の「KT-GSHVTs」．

金属は数種類あり，その種類によって電圧と温度差の相関関係が異なるため，測定器の設定を間違えると正しい温度が測定できない．

温度測定結果は一見「事実」に見えるので，疑いもなく信じてしまいがちですが，上記について留意して測定しないと，同じ製品でも測定者によって結果が異なるという結果になってしまいます(図23)．

5 今後の放熱設計

● 鉄則7　シミュレーションは精度だけを追うと活用できない

最近では，シミュレーションを活用した放熱設計を行うことも珍しくなくなってきましたが，その位置付けは各プロジェクト・チームにより全く異なります．と言うのは，

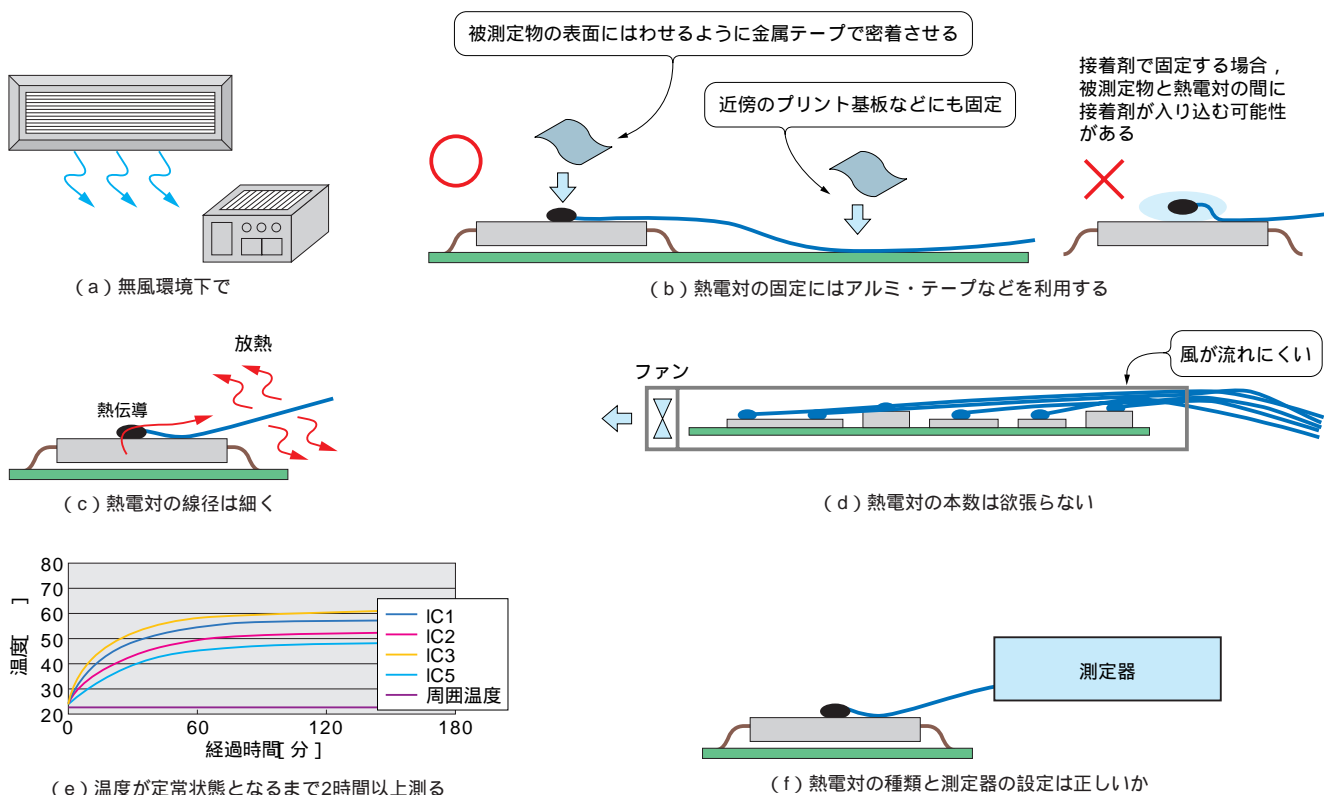



図22　熱電対を利用した温度測定で気を付けるべき点

図23
熱電対を利用した温度測定結果の例
図22に留意して測定しないと，同じ製品でも測定者によって結果が異なる．

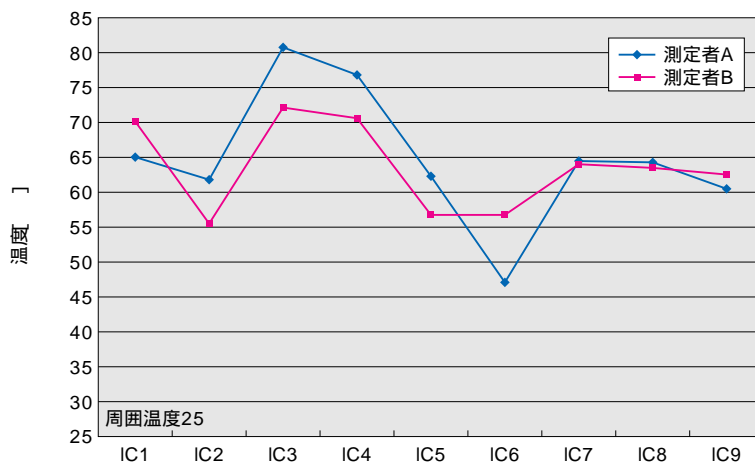
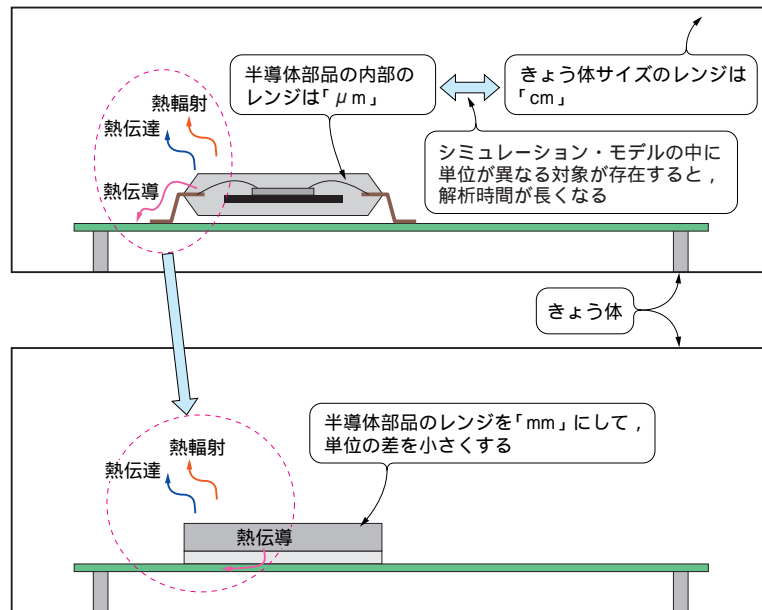



図24
半導体部品からの放熱経路と熱量が等価となるような簡易モデルを作成する

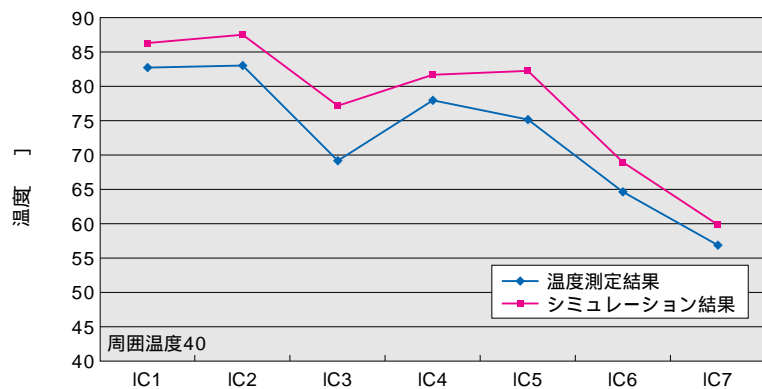



図25
シミュレーション結果と実測値の比較例
数値こそ違えど，値の相関性は高い．

シミュレーション結果は信ぴょう性がない（温度測定結果と合わない），シミュレーション結果は温度測定結果よりも高温になると聞いたことがあるなどのイメージにより，シミュレーションにコストをかけるくらいなら試作後の温度測定結果を基に試行錯誤しながら対策検討した方がよいと考える設計者もまだ多いためと思われます．

たしかに，シミュレーション結果と試作後の温度測定結果を比較すると，

- 予想発熱量の見積もり誤差が大きい
- 解析モデルの簡易化が適していなかった（図24）

などが原因となり，一致しないこともあります．しかし，「シミュレーション結果＝温度測定結果」とすることを第1目標として，対策検討はその次のステップと考えてしまうと，せっかくの便利なシミュレーション・ツールも宝の持ち腐れとなってしまいます．

仮にシミュレーション結果と温度測定結果に誤差があったとしても，ほとんどの場合，その傾向は似ていることが多いので（図25），設計案の相対的な比較検討として十分活用できます．

本稿の中でも，シミュレーションによる事例をいくつか紹介しましたが，相対的な比較として例えば，プリント基板は垂直置きと水平置きのどちらが有利か，基板に風を流すために通気孔やファンの位置はどう配置するのが有効かなどの比較には十分活用できます．シミュレーションは試作前のまだ製品が目の前にない段階でのアイデア出し，定性的な検証ツールとして，非常に強力な武器となります．このような活用の仕方が十分できていれば，精度の追及は試作後の合わせ込み後でもよいのです．

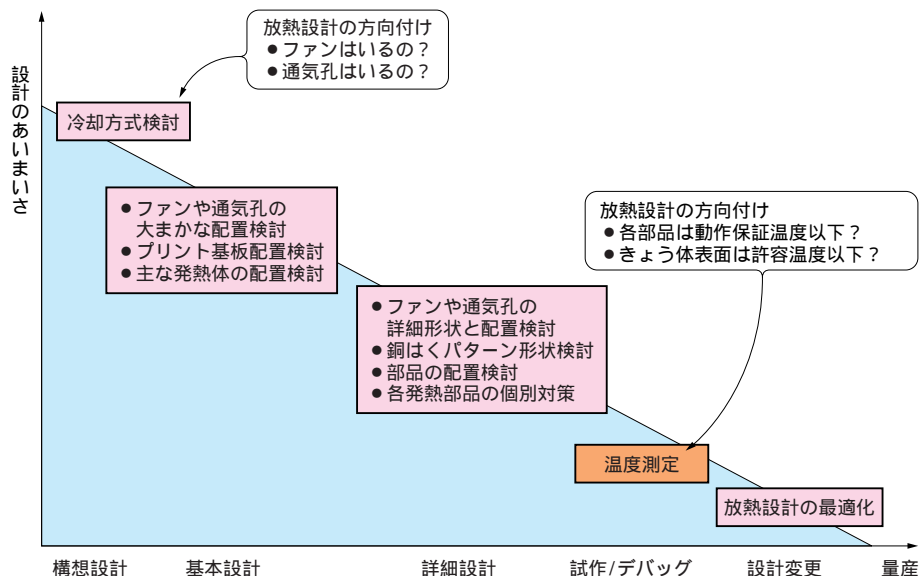



図26
各設計段階における放熱設計項目
放熱設計の鉄則をマスタし，手戻りのない設計を行うべし．

もちろん，シミュレーションの精度はモデルを作成する人に依存する部分も多いため，以下のようにシミュレーションを有効に生かすことが必要不可欠です．

1）共通部品のシミュレーション・モデルをライブラリ化する

例えば，半導体部品のモデルを作成する際，内部のチップ・リードなどの構造を詳細にモデル化しようとすると（図24），シミュレーション・モデルのレンジがμm単位まで必要になるので，計算時間が長くなり実用的ではありません．そのため，精度に影響がない程度に形状を簡易化した等価モデルを作成する必要があります．温度測定結果と比較しながら適したモデルを作成することになりますが，これをライブラリ化することで，誰がシミュレーションを行っても同じ結果が得られるようになります．

2）物性値ではないデータ（接触熱抵抗値など）を測定してライブラリ化する

例えば，二つの放熱板をネジで締め付けた個所のモデル（熱伝導による熱の流れ）を作成する際，その両者間の接触熱抵抗値は物性値ではないので不明です．この設定を間違えると，熱の流れが正しく再現されなくなってしまいます．そのため，締め付けトルク別のシミュレーション・モデルをライブラリ化しておくと，誰がシミュレーションを行っても同じ結果を得られるようになります．

3）常に温度測定結果との比較を行う

誤差の要因（予想発熱量の見積もりの妥当性，解析モデルの簡易化の妥当性など）を分析し，その要因をシミュレーション・モデルに反映させ，検証を繰り返します．

このように，各設計段階における「放熱設計の鉄則」を考慮しながら段階的な放熱設計（図26）を行っていくことで，試作後の大きな手戻りを防ぐことができるのです．

参考・引用*文献

(1) 伊藤謹司，国峰尚樹；トラブルを避けるための電子機器の熱対策設計，1992年，日刊工業新聞社．
(2) 国峰尚樹；エレクトロニクスのための熱設計完全入門，1997年，日刊工業新聞社．
(3)* ヒートシンク製品カタログ，リョーサン．
http://www.ryosan.co.jp/business/pdf/heat_sinks061005.pdf

さわい・ゆみこ
住友電工システムソリューション（株）
シムデザイン・テクノセンター

<筆者プロフィール>
澤井由美子．入社以来ずっと，LAN製品やセキュリティ関連製品，自動車関連製品の放熱設計一筋．今では，家電量販店に行って新製品のパソコンやゲーム機を見ると，放熱構造はどんな感じになっているのだろう…と，分解して，内部を見たい衝動に駆られる．

2